

УДК 691.175:519

**Ф. САЛИХ**, аспирант, ОГАСА, Одесса

**С. КОВАЛЬ**, докт. техн. наук, проф.,

Варминско-Мазурский Университет, Ольштын, Польша

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА ПРИ ПОЭТАПНОМ ВВЕДЕНИИ ДОБАВОК**

Предложен и исследован способ сохранения технологических свойств самоуплотняющейся бетонной смеси в условиях сухого жаркого климата при поэтапном введении добавок.

**Ключевые слова:** самоуплотняющийся бетон, суперпластификатор, замедлитель твердения, ускоритель твердения, моделирование свойств.

**Анализ проблемы.** В последние годы множество масштабных строительных проектов в странах Ближнего Востока реализуются с использованием самоуплотняющихся бетонов (Self-compacting concrete, SCC), изготавливаемых на основе высокотехнологичных добавок – суперпластификаторов [1, 2]. Однако бетонные смеси типа SCC в условиях сухого жаркого климата Ирака способны достаточно быстро терять свои технологические свойства (в случае перерывов в работе, длительного транспортирования и т.п.). Поэтому важной задачей является обеспечение необходимых показателей качества таких смесей перед укладкой в конструкцию. Добавление воды перед укладкой в конструкцию не только не гарантирует восстановление всей гаммы специфических свойств SCC, но приводит снижению эксплуатационных характеристик бетона. Необходимость обеспечения свойств бетонной смеси определяет целесообразность использования *поэтапного введения добавок* («two-step mixing method», TSMM), добавляя суперпластификатор порциями, в том числе непосредственно на стройплощадке перед укладкой бетонной смеси в конструкцию [3].

**Целью работы** является обоснование способа обеспечения заданных свойств самоуплотняющейся бетонной смеси и прочности твердеющего бетона при использовании трех типов добавок, вводимых в два этапа [4]. На начальном этапе при смешивании компонентов вместе с водой затворения вводится часть общей дозы суперпластификатора ( $СП_1$ ) + замедлитель твердения.

© Ф. Салих, С. Коваль, 2013

Эта комплексная добавка позволяет увеличить период сохранности технологических свойств бетонной смеси, хотя и может привести к снижению прочности бетона в раннем возрасте твердения.

Перед укладкой бетонной смеси добавляется еще одна порция суперпластификатора (СП<sub>2</sub>), но уже вместе с ускорителем твердения. Предполагается, что вторая порция суперпластификатора СП<sub>2</sub> позволит восстановить потерю технологической эффективности бетонной смеси, а ускоритель – компенсировать возможную потерю ранней прочности бетона от введения суперпластификатора и замедлителя.

Предварительный анализ, выполненный при исследовании кинетики роста пластической прочности цементных паст показал, во-первых, отличие индивидуального влияния добавок (рис. 1а), по сравнению с комплексным (рис. 1б), во-вторых, возможность резкого уменьшения структурной прочности в момент введения дополнительных порций добавок; во-третьих, возможность удлинения индукционного периода, что продлевает время сохранности текучести смеси. Добавочное введение ускорителя в составе «вторичной» комплексной добавки позволяет ускорить формирование структуры цементной матрицы бетона, что должно положительно сказаться на росте ранней прочности бетона в конструкции.

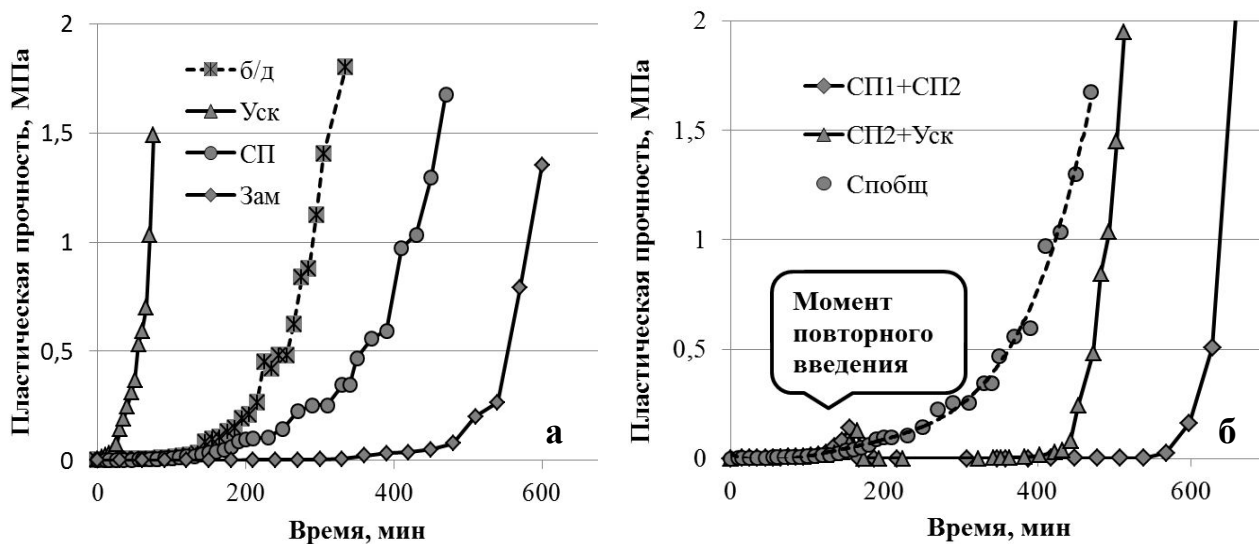


Рис. 1 – Кинетика роста пластической прочности: а – при обычном, б – поэтапном введении добавок.

**Методика** оценки качества бетонной смеси предусматривала использование тестов [5], рекомендованных европейской комиссией по самоуплотняющемуся бетону (EFRAKC). Определялись диаметр и время распыла ко-

нуса бетонной смеси (характеристики растекаемости), показатель вязкости как время истечения бетонной смеси из V-образной воронки (тест «V-funnel») и показатель самовыравнивания как отношение уровней  $H_2/H_1$  до ( $H_1$ ) и после ( $H_2$ ) прохождения смеси между прутьями  $d = 14$  мм в аппарате L-образном ящике (тест «L-box»). Последний тест имитирует распределение смеси в форме при заданном расстоянии между стержнями арматурного каркаса. Оценка бетонных смесей по степени расслоения велась визуально по методике Американского института по испытанию материалов (ASTM).

Базовый состав бетона был подобран таким образом, чтобы бетонная смесь отвечала требованиям самоуплотнения при обеспечении: класса SF2 по расплыву ( $D = 75$  см), класса VS2/VF2 по вязкости (время распыла 3 секунды и истечения из воронки Funnel – 12 секунд); класса по самовыравниванию RA2 (отношение уровней смеси в аппарате L-box – 0,87); класса сегрегации SRI = 1 (Upper Right) при хорошем распределении заполнителя допускается ободок цементного раствора на внешней границе.

Требуемые характеристики были получены при использовании цемента ПЦ II/A–III, состоящего из клинкерного цемента –  $400 \text{ кг/м}^3$  и добавки молотого шлака –  $160 \text{ кг/м}^3$  (40 % от массы цемента), песка в количестве  $703 \text{ кг/м}^3$ , щебня фракции 5 – 10 мм –  $793 \text{ кг/м}^3$ , суперпластификатора «Супер ПК» на базе поликарбоксилатов – 1,3 % раствора добавки от массы цемента.

В опытах с самоуплотняющимся бетоном, проведенных по плану эксперимента, изменялось в заданных диапазонах количество добавок (в процентах от массы цемента):

1 – замедлитель ( $Z = X_1 = 0,01 \pm 0,01$ ), добавляемый вместе с первой порцией СП<sub>1</sub> (карбоксиметилцеллюлоза – КМЦ, одновременно снижающая степень расслоения смеси);

2 – суперпластификатор ( $СП_2 = X_2 = 0,1 \pm 0,1$ );

3 – ускоритель ( $УС = X_3 = 1,0 \pm 1,0$ ), вводимые на заключительном этапе.

Измерение технологических параметров бетонной смеси проводили после 1 часа ее выдержки при температуре  $30 \pm 2$  °С.

**Обсуждение результатов.** Дополнительное введение суперпластификатора приводит к восстановлению регламентируемых показателей качества самоуплотняющейся бетонной смеси (рис. 2), что подтверждает целесообразность введения этой и других добавок по методу TSMM в случае необходимости длительного сохранения свойств самоуплотняющихся бетонных смесей.

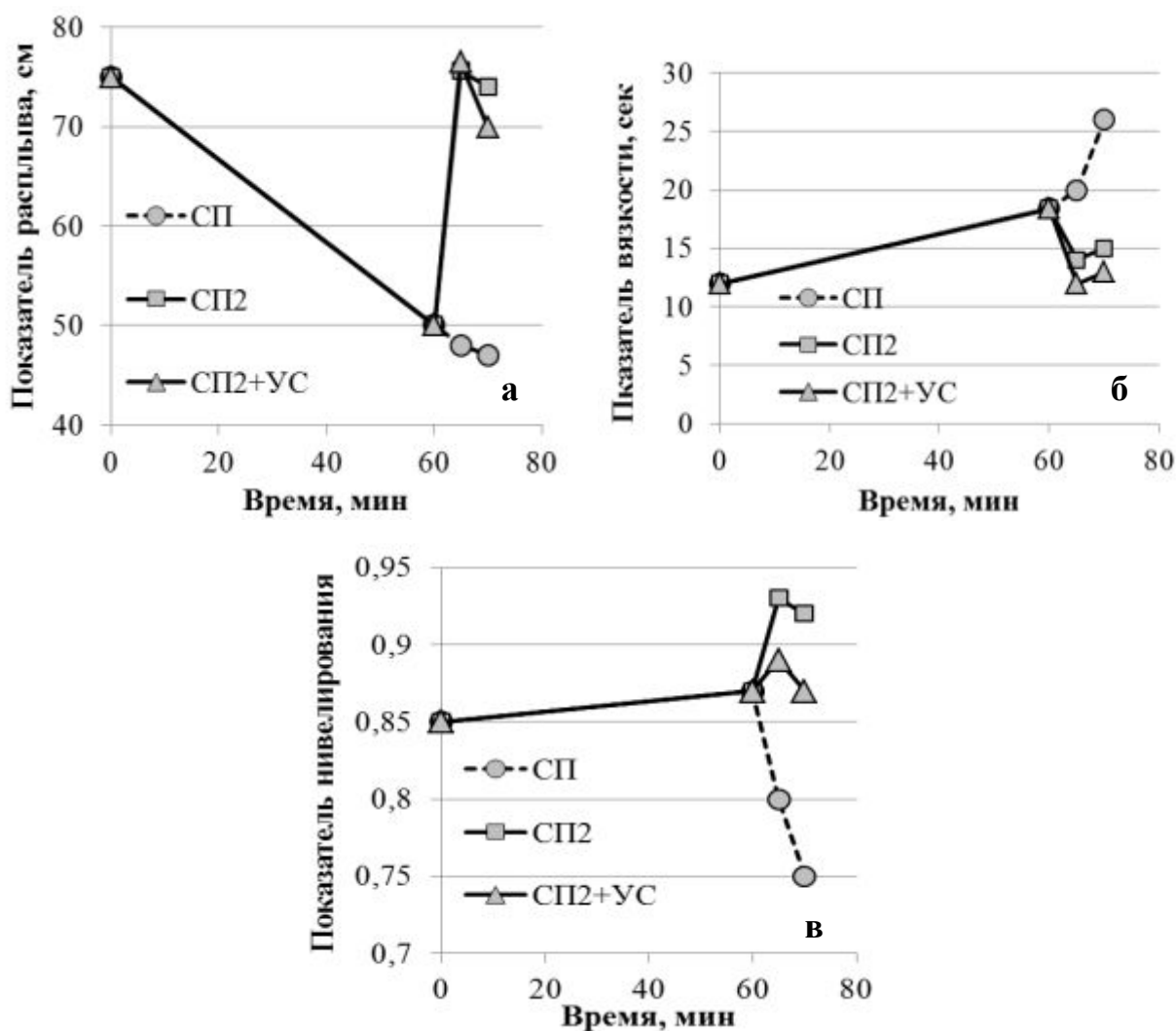


Рис. 2 – Изменение показателей качества бетонной смеси при использовании схемы комбинированного повторного введения добавок: а –показатель распыляе; б –время истечения; в –показатель самонивелирования

Полученные экспериментально-статистические модели описывали влияние переменных дозировок добавок, введенной на первом ( $X_1$ ) и заключительном этапе ( $X_2, X_3$ ) после 1 часа выдержки при заданной температуре.

Зависимости свойств бетона представлены в виде полиномов второй степени:

$$Y = b_0 + bx_1 + bx_2 + bx_3 + bx_1^2 + bx_2^2 + bx_3^2 + bx_1x_2 + bx_1x_3 + bx_2x_3$$

с числовыми оценками коэффициентов, отражающими индивидуальное влияние добавок ( $bx_1, bx_2, bx_3$ ), скорость этого влияния ( $bx_1^2, bx_2^2, bx_3^2$ ) и эффекты взаимодействий ( $bx_1x_2, bx_1x_3, bx_2x_3$ ).

При исследовании способа двустадийного введения добавок ЭС-модели-

рование добавок имеет ряд особенностей, в частности, коэффициенты характеризуют как начальные, так и «поздние» эффекты добавок [6].

Анализ графических образов моделей свойств бетонной смеси (рис. За-в) показывает, в частности, что ускоритель способствует усилению действия второй дозы суперпластификатора. В то же время карбометилцеллюлоза не оказывает практически значимого эффекта на изменение этих характеристик. Может быть отмечено отдельное понижение времени истечения бетонной смеси (снижение вязкости) при введении КМЦ в сочетании с повышенными дозировками суперпластификатора или ухудшение показателя самонивелирования в случае введения этой добавки без повторного дозирования суперпластификатора.

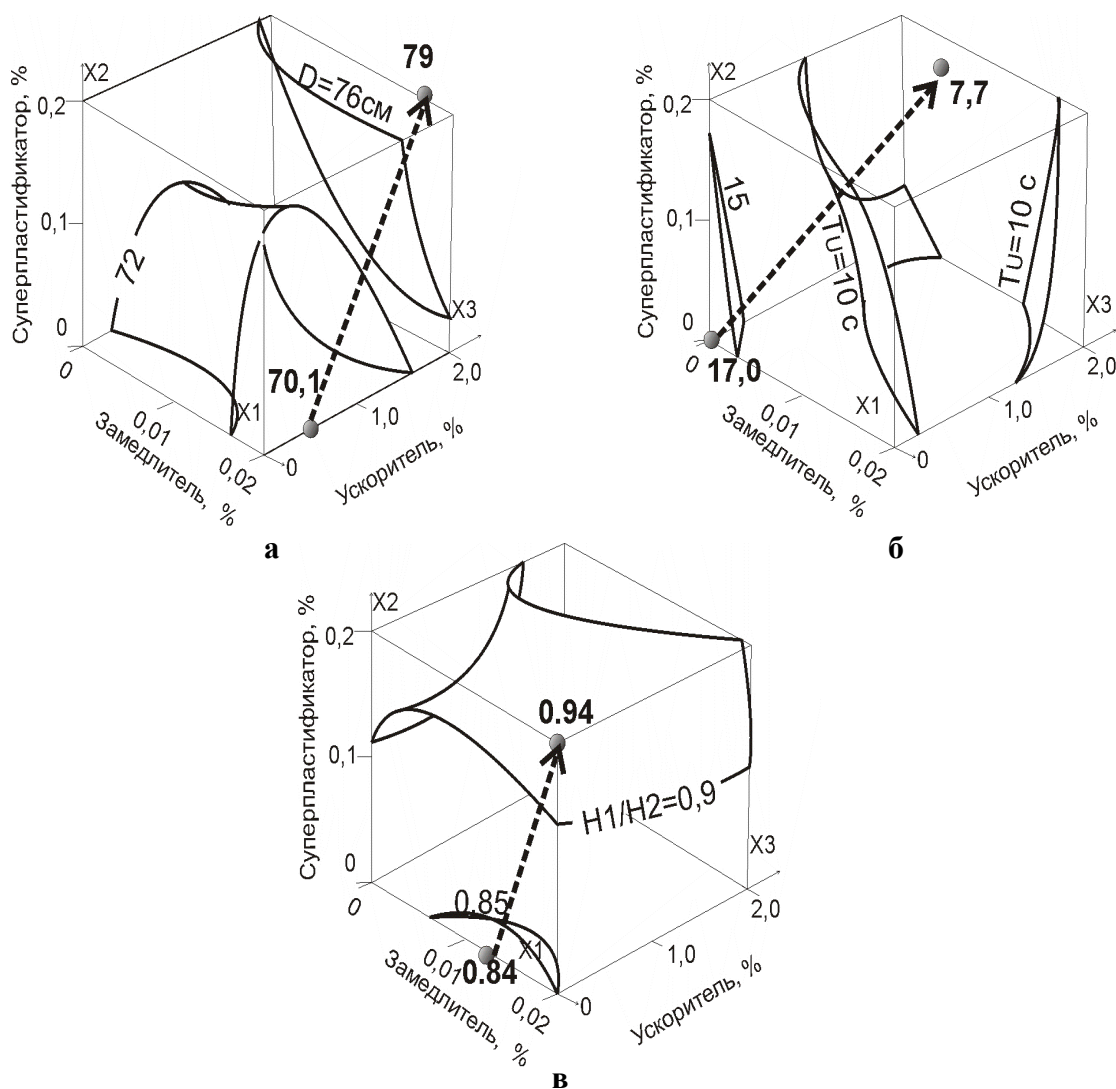


Рис. 3 – Изоповерхности моделей, описывающих влияние добавок, введенных на разных этапах, на показатели бетонной смеси: а – распыла, б – истечения из воронки, в – самонивелирования.

Рост прочности бетона характеризуется положительной динамикой в случае повторного модифицирования добавками (рис. 4а).

Повышение количества карбоксиметилцеллюлозы приводит к замедлению твердения, что отражается на ранней прочности бетона (рис. 4б).

Анализ моделей показал, что добавка ускорителя введенного на заключительном этапе хотя и позволяет частично компенсировать снижение ранней прочности (рис. 4г) в случае повышения вторичной дозировки суперпластификатора (рис. 4в), но только в отсутствие и при малом количестве замедлителя.

Его эффективность на этом этапе зависит от преобладания процессов ионного обмена над процессами адсорбции ПАВ. Дальнейший анализ показал, что бетоны с рациональными концентрациями добавок имеют незначительное водопоглощение, что вероятно связано с благоприятным действием добавки на формирование поровой структуры цементного камня.

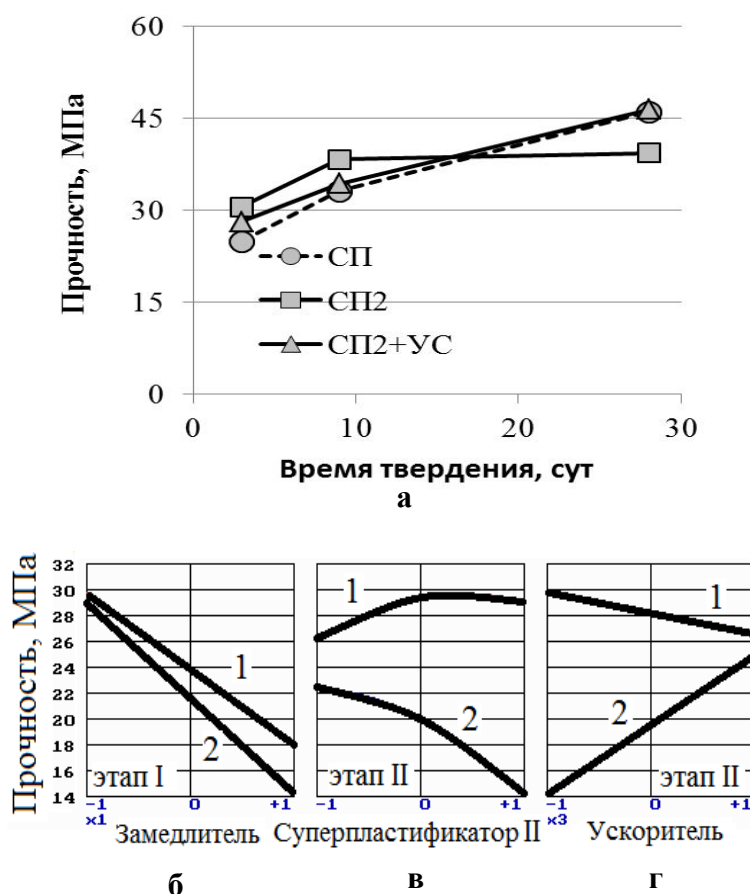


Рис. 4 – Кинетика прочности бетона при комбинированных способах повторного введения добавок (а) и влияние первоначальной дозировки замедлителя (а), вторичной дозы суперпластификатора (б) и ускорителя (в), введенного на последнем этапе, на прочность бетона в возрасте 3 суток.

## Выводы.

Експериментально обоснована многоступенчатая схема введения добавок с учетом требований технологии изготовления конструкций. Разработан способ поэтапного модифицирования бетона за счет введения в бетонную смесь перед укладкой в конструкцию ускорителя для компенсации замедляющего действия повторной дозы суперпластификатора, которая обеспечивает восстановление технологических свойств самоуплотняющейся смеси после длительного транспортирования или консервации. В зависимости от требований к бетону какая-либо добавка может быть из схемы исключена или добавлена. При этом повторное модифицирование не противоречит идеи получения готовых комплексных добавок, а лишь развивает ее.

**Список литературы.** 1. *Okamura H. Mix Design for Self-Compacting Concrete / H. Okamura, K. Ozawa // Concrete Library of JSCE. – 1995. – № 25. – P. 107 – 120.* 2. *Koval S. Searching of self-compacting concrete composition with the statistical models / S. Koval, M. Ciak, M. Sitarski // Cement, wapno, beton. – 2013. – № 4. – S. 197 – 206.* 3. *Neville A.M. Właściwości betonu / A.M. Neville. – [Wydanie czwarte]. – Kraków: Wydawnictwo Polski Cement, 2010. – 829 s.* 4. *Коваль С.В. Повышение сохранности бетонной смеси при поэтапном введении добавок / С.В. Коваль, Ф.И. Салех // Вісник ДонДАБА. – 2013. – №1 (99). – С. 21 – 25.* 5. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete. Specification, Production and Use: SCC 028. – UK: BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC, 2005. – 63 p. (The Self-Compacting Concrete European Project Group).* 6. *Ostryzhniuk M. Quality Assurance of Self-Compacting Concrete Mix in the Hot Climates / M. Ostryzhniuk, F.I. Salih // XLII Miedzynarodowe Seminarium Kół Naukowych, 21-22 maja 2013 r.: Streszczenia. – Olsztyn, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, 2013. – S. 691 – 692.*

*Поступила в редколлегию 21.10.13*

УДК 691.175:519

**Моделирование свойств самоуплотняющегося бетона при поэтапном введении добавок / Ф. САЛИХ, С. КОВАЛЬ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 57 (1030). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 38 – 44. – Бібліогр.: 6 назв.**

Запропоновано і досліджено спосіб збереження технологічних властивостей самоущільнюючої бетонної суміші в умовах сухого жаркого клімату при поетапному введенні добавок.

**Ключові слова:** самоущільнюючий бетон, суперпластифікатор, уповільнювач тверднення, прискорювач тверднення, моделювання властивостей.

The method of maintenance of technological properties of self-compacting concrete mixture offers and investigational in the conditions of dry roast of climate at stage-by-stage introduction of additions.

**Keywords:** self-compacting concrete, superplasticizer, retarder hardening, hardening accelerator, simulation properties.